

УДК 621.311:658.26

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

В

Г.Б. Бурдо, Б.В. Палух, А.Н. Болотов, С.Р. Испириян

Принципы выбора системы критериев

Система критериев на промежуточных уровнях декомпозиции процесса технологического проектирования (ПТП) в системах автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) с элементами искусственного интеллекта (ИИ) – необходимое условие для отбора целесообразных вариантов [1, 2, 4]. Так как решения на высших уровнях ПТП из-за малой степени детализации невозможно оценить в параметрах окончательного, оценки носят логический характер. Степень точности критериев при переходе к следующим уровням должна увеличиваться, что позволяет целенаправленно приближаться к оптимальному общему решению. Для повышения эффективности процедур поиска решений на каждом уровне отбирается несколько вариантов, так как не имеется математического доказательства того факта, что получение оптимальных решений на высших уровнях обеспечивает глобальный оптимум технологического процесса (ТПр) механической обработки. Необходимость выбора нескольких решений вызвана и приближенностью критериев. Интервалы значений критериев выбираются так, чтобы с одной стороны не увеличивать число детализируемых в дальнейшем вариантов, с другой – не потерять лучшее или близкое к нему решение.

Были сформулированы основополагающие принципы [2, 3], определяющие формирование следующих критериев.

1. Комплексность – учет важнейших факторов в их взаимовлиянии на результаты решения общей задачи.
2. Критерии должны иметь количественный вид, позволяющий выявить связь параметров общего решения и значения критерия уровня. Критерий должен быть чувствительным к изменению параметров ТПр и пропорциональным, увеличение интервалов критериев должно повлечь увеличение интервалов параметров ТПр.
3. Критерии должны отражать все уровни ПТП, основные структурные и параметрические системные свойства ТПр на уровнях, и быть модифицируемым в связи с изменениями в производственной системе (ПС).
4. Достижение конечной цели и иерархичность / подчиненность промежуточных критериев общему критерию, то есть рассмотрение критериев уровней как единой иерархической системы.
5. Смысловое содержание критериев должно соответствовать смысловому содержанию решения уровня, что упрощает управление проектированием.
6. Критерии на уровнях должны обеспечивать получение решений в постепенно сужающихся пространствах поиска.

Формирование критериев оценки решений в САПР ТП

Наиболее часто на первом уровне проектирования (укрупненная схема ТПр) используют следующие критерии: минимумы технологической себестоимости, $C_m \rightarrow \min$; приведенные затраты, $C_{прив.} \rightarrow \min$; неполное оперативное время, $t_{on} \rightarrow \min$; максимум технологической производительности резания, $K_m \rightarrow \max$. Критерии предусматривают знание параметров переходов, синтезируемых на последнем уровне, что приводит к длительным итерационным процедурам проектирования. Использование приближенных данных снижает точность.

Выбор заготовки в условиях единичного и мелкосерийного производства часто ограничивается различным сортовым прокатом, поэтому этапы обработки допускают лишь частичную перестановку. Основным управляемым параметром критерия являются

маршруты обработки поверхностей (МОП), зависящие от вида заготовки и отражающие особенности состава этапов (вид и место термической обработки, наличие заготовительного этапа и так далее). Поэтому МОП детали могут быть достаточно объективной оценкой решения уровня.

Рассмотрим характеристики: мощность обобщенного маршрута обработки поверхностей, $M_O = \bigcup MOП_i = \bigcup \{ПЕР_j\}_i$, где i – номера обрабатываемых поверхностей, j – порядковый номер перехода; мощность пересечения маршрутов обработки $M_{II} = \bigcap MOП_i = \bigcap \{ПЕР_j\}_i$. Оценим множества M_O и M_{II} по системному параметру перехода – виду обработки (методу технологического воздействия), число элементов в множествах N_O и N_{II} , найдем их соотношение $K_{II} = N_O / N_{II}$ и проанализируем.

Увеличение N_O / N_{II} соответствует использованию большего числа различных методов, увеличению числа установок и переналадок оборудования, загрузке большего числа станков и определяет дифференциацию ТПр на операции.

Уменьшение N_O / N_{II} способствует концентрации обработки за счет сокращения различных ее методов, уменьшения числа операций и так далее, а также отражает степень унификации ТПр на предприятии.

Оценим множества M_O и M_{II} по системному признаку – типу применяемого инструмента (число элементов в множествах N_O^I и N_{II}^I). Отношение $K_{II} = N_O^I / N_{II}^I$ прямо характеризует тенденцию к увеличению (уменьшению) числа применяемого инструмента и затрат на него, косвенно-указанное выше касательно ТПр. Соотношение характеризует структурные составляющие ТПр и соответствует его уровню.

Рассмотрим величину, обозначив ее $K_{ТП}$ – коэффициент состояния ТП:

$$K_{ТП} = (Z_T / 0,85)^{m1},$$

где Z_T – приведенная загрузка по типам оборудования, применяемого для реализации множества переходов MO ; $Z_T = \sum^n Z_{IIi}$, где Z_{IIi} – приведенная загрузка i -го типа станка, n -их количество; 0,85 – нормативная загрузка, рекомендуемая для предприятий указанного типа производств по плановым работам; $m1$ – показатель степени. Загрузка учитывается только по лимитирующим типам оборудования.

Для учета влияния объема обработки каждого вида, Z_{IIi} рассчитывается по формуле

$$Z_{IIi} = (Z_i \times p_i) / p,$$

где Z_i – фактическая загрузка i -го типа станка на настоящее время, p_i – число переходов, выполняемых на данном типе станка, p – общее их число по деталям.

$K_{ТП}$ объемно учитывает загрузку оборудования, характеризует готовность ТП к работе. Чем его величина больше, тем более дифференцирован должен быть ТПр (с целью обеспечения равномерной загрузки оборудования и предотвращения узких мест).

Рассмотрим произведение K_{II} и $(1 / K_{ТП})$, обозначив его K_1^I :

$$K_1^I = (\bigcup MOП_i / MOП_i) \times (1 / K_{ТП}) = (N_O / N_P) \times (1 / (Z_T / 0,85)^{m1}).$$

K_1^I отражает структуру ТПр по методам обработки, учитывает ожидаемое распределение этих методов по станкам, изменение загрузки оборудования, что позволяет использовать его в качестве критерия. Рассмотрим $K_2^I = K_{II} * (1 / K_{ТП})$:

$$K_2^I = (N_O^I / N_P^I) \times (1 / (Z_T / 0,85)^{m1}).$$

K_2^I характеризует структуру ТПр с точки зрения инструмента и влияние на загрузку множества предусмотренных переходов, то есть носит комплексный характер, но более явно связан с затратами, нежели K_1^I .

Поэтому первый критерий $K_1^I = E_1^I$ следует использовать, если ЦФ ТПр $Q \rightarrow \max$, а второй – $K_2^I = E_2^I$, когда $C \rightarrow \min$:

$$K_{1\min} \leq E_1^1 \leq K_{1\max}, K_{2\min} \leq E_2^1 \leq K_{2\max}.$$

Если критерий – минимальный цикл изготовления деталей $T_y \rightarrow \min$, то он предполагает дифференциацию ТПр на операции, и обработку на рабочих местах параллельно-последовательную. В этом случае фактическая загрузка ТП во внимание не принимается ($K_{ТП} = 1$), а K_I^1 смещен в сторону больших величин, поэтому критерий $E_3^1 = K_{II}$:

$$K_{3\min} \leq E_3^1 \leq K_{3\max}.$$

Значения $K_{1\max}$, $K_{2\max}$, $K_{1\min}$, $K_{2\min}$, $K_{3\max}$, $K_{3\min}$ установлены на основе опыта ИМ, сравнения расчетных и фактических параметров ТПр и значений критериев, которые уточняются в процессе работы. Их значения для некоторых типов деталей по результатам внедрения САПР ТП на ООО «Нефтегеофизика» (г. Тверь) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Граничные значения критериев

Тип детали	$K_{1\min}^1$	$K_{1\max}^1$	$K_{2\min}^1$	$K_{2\max}^1$	$K_{3\min}^1$	$K_{3\max}^1$	m_1
Головки, корпуса	1,5	3,4	1,8	3,2	1,7	4,3	0,7
Втулки	1,7	3,6	1,8	3,4	1,9	4,1	0,7
Валы, штоки	1,5	4,1	1,8	3,7	1,8	4,5	0,7

На уровне маршрутной технологии находят применение такие критерии: максимальная производительность операции, $Q_{оп} \rightarrow \max$; минимумы приведенных затрат, $C_{Пр.оп} \rightarrow \min$; технологическая себестоимость, $C_{Тон} \rightarrow \min$ и трудоемкость, $t_{Ш,К} \rightarrow \min$. Критерии приближены, так как точных параметров, позволяющих их рассчитать, еще нет, и не совсем очевидна взаимосвязь параметров и структуры ТПр с критериями.

Рассмотрим соотношение $K_0 = \kappa/q$, где κ – число операций в маршруте, q – число этапов механической обработки. Увеличение K_0 ведет к дифференциации ТПр, уменьшение – к концентрации, то есть он характеризует основные структурные составляющие ТПр и его производительность.

Рассмотрим выражение $K_D = (L_p/L_0)^{m^2}$, где L_0 – размер оптимальной партии, определяющий дифференциацию ТПр, L_p – размер фактической партии запуска. При увеличении партии деталей L_p целесообразно увеличивать дифференциацию ТПр (и наоборот). На данном уровне уточнены группы станков в пределах типа, поэтому введем величину $K_{ТП}^2$:

$$K_{ТП}^2 = (3_{\Gamma}/0,85)^{m^1},$$

где 3_{Γ} – приведенная загрузка по группам оборудования в пределах типа; $3_{\Gamma} = \sum 3_{ГПi}$, где $3_{ГПi}$ – приведенная загрузка i -й группы, $3_{ГПi} = (3_i \times p_i)/p$; 3_i – фактическая загрузка i -й группы станков.

Рассмотрим $K_1^2 = K_0 \times (1 \div K_{ТП}^2)$. Значение K_I^2 отражает структуру спроектированной технологии и состояние ТП. Поэтому $K_1^2 = \frac{\kappa}{q} \times (1/(3_{\Gamma}/0,85)^{m^1})$ можно использовать как критерий E_1^2 , если ЦФ ТПр $Q \rightarrow \max$ (индекс сверху означает уровень): $K_1^2 \min < E_1^2 < K_1^2 \max$.

Проанализируем $K_2^2 = E_2^2 = K_0 \times (1 \div (K_{ТП}^2 \times K_D))$. K_D учитывает экономическую сторону технологии. Тогда, при $K_I^2 \min = K_2^2 \min$ и $K_I^2 \max = K_2^2 \max$ и $L_p < L_0$ ($K_D < 1$)

выдерживание соотношения $K_2^2 \min < E_2^2 < K_2^2 \max$ приводит к уменьшению K_O , то есть к концентрации обработки, и наоборот. Критерий эффективен при ЦФ ТПр $C \rightarrow \min$.

При ЦФ ТПр $T_{Ц} \rightarrow \min$, $E_3^2 = K_3^2 = K_O$ и критерий $K_3^2 \min < E_3^2 < K_3^2 \max$, но границы смещены в сторону больших значений. Значения границ определяются теми же соображениями, что и для критериев 1-го уровня, и учитывают специфику оборудования с ЧПУ. Значения рекомендуемых начальных интервалов критериев приведены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные значения критериев

Тип детали	$K_{1\min}^2$	$K_{1\max}^2$	$K_{2\min}^2$	$K_{2\max}^2$	$K_{3\min}^2$	$K_{3\max}^2$	m_1
Головки, корпуса	1,3	1,9	1,5	2,0	1,7	2,5	0,8
Втулки	1,1	1,6	1,4	2,2	1,5	2,1	0,8
Валы, штоки	1,2	1,7	1,3	2,0	1,55	2,3	0,8

Выбор компромиссной схемы критериев, отражающей принцип справедливой относительной уступки (в виде произведения), гласит: «Справедливым является такой компромисс, при котором суммарный относительный уровень снижения качества одного или нескольких критериев не превосходит суммарного относительного уровня повышения качества по остальным критериям». Он обусловлен некоторыми соображениями. Критерии базируются на анализе и сравнении величин изменения локальных критериев, которые, учитывая наличие компромисса, неизбежны. Формирование критериев по принципу справедливой относительной уступки обеспечивает сглаживание уровней локальных критериев, немаловажно и то, что метод не очень чувствителен к масштабу изменения критериев.

На уровне проектирования операционной технологии обычно рекомендуется использовать критерии неполного штучного $t'_{шт}$, неполного вспомогательного времени $\Sigma t'_B$, себестоимости обработки совокупности переходов $\Sigma C_{пер}$. Очевидно желание найти соответствие между параметрами общего решения, оцениваемого Q и C . Однако, отсутствие данных по режимам резания, по используемому инструменту (определяются позднее) затрудняет расчет либо приводит к итерационным процедурам, также в критериях не отражено состояние ТП.

Рассмотрим выражение для неполного штучного времени, учитывающее только изменяемые затраты времени на выполнение операции:

$$t'_{шт} = (\sum l_{pxi} / S_i + \sum l_{xxj} / V_{xxj} + t_{cuk})_V,$$

где l_{pxi}, l_{xxj} – длины рабочих и холостых ходов; S_i, V_{xxj} – величина подачи рабочих и скорости холостых ходов; t_{cuk} – время на k -ую смену инструмента; V – номер варианта структуры. Первый член в выражении характеризует затраты основного времени, два других – вспомогательного.

Рассмотрим связь вида оборудования с возможностью использования критерия $t'_{шт}$. Для оборудования с ручным управлением длины рабочих ходов и последовательность смены инструмента определены при синтезе структур операций, а холостые хода произвольно определяются рабочим, поэтому суммарная длина рабочих ходов будет единственным объективным критерием.

Оборудование с ЧПУ следует рассмотреть по типам. Для токарного оборудования с ЧПУ важнее оценка затрат на рабочие ходы, так как холостые выбираются максимально короткими, их скорости превышают на порядки скорости подач рабочих. Рабочие ходы

определяют выбор инструмента и время его смены, но учитывая его малость по сравнению с обработкой, время смены можно не учитывать. Для фрезерно-сверлильно-расточных станков с ЧПУ ситуация иная. Объемная фрезерная обработка строится на основании типовых траекторий или с использованием программных средств, затраты времени на эту обработку для данной детали постоянны. Основное время обработки поверхностей сверлением, растачиванием, развертыванием, нарезанием резьбы и так далее определяется длиной поверхности, поэтому эти затраты времени для данной детали постоянны. Для данного вида оборудования оптимальность структуры определяется временем перехода от обработки одной поверхности к другой.

Для учета состояния ТП, помня, что модель оборудования определяется на данном уровне, введем критерий $K_{3q} = (3_q / 3_{mo})^{m3}$, где 3_q – загрузка, q – станки из выбранной группы; средняя загрузка K станков группы – $3_{mo} = \sum 3_q / K$.

Для универсальных станков при ЦФ $Q \rightarrow \max$

$$\forall v, q \left[\sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}} \times K_{3q} \right]_{\min} = E_{1\min}^3 \text{ и } \left[\sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}} \times K_{3q} \right] = E_1^3,$$

получим:

$$K_1^3 \times E_{1\min}^3 \geq E_1^3 \geq E_{1\min}^3,$$

где v – номер варианта; K_1^3 – коэффициент, рекомендуется на первом этапе принимать равным 1,3...1,4.

Если в качестве ЦФ используется $C \rightarrow \min$, то, допустив, что затраты по оборудованию и инструменту пропорциональны длинам рабочих ходов, получим величину общих затрат 3_{ql} :

$$3_{ql} = \left(\sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}} \right) \times C_{cq} + \sum_l^n \left(\left(\sum_{p_{xj}}^{p_l} l_{p_{xj}} \right)_l \right) \times C_{ul},$$

где C_{cq} – стоимость станко- часа работы q -го станка без учета затрат по инструменту; C_{ul} – затраты по l -му инструменту ($l=1, n$), отнесенные к 1-му часу времени резания; $l_{p_{xjl}}$ – j -й рабочий ход l -го инструмента, $j=1, p_i$; $\sum_l^n \left(\sum_{p_{xj}}^{p_l} l_{p_{xj}} \right)_l = \sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}}$; $n \times p_i = m$ – общее

число рабочих ходов. Обозначив $\forall (q, l (3_{ql}))_{\min} = E_{2\min}^3$, получим критерий:

$$E_2^3 : K_2^3 \times E_{2\min}^3 \geq E_2^3 \geq E_{2\min}^3.$$

Можно принять $K_2^3 = K_1^3$. Если в качестве ЦФ выбрано $T_u \rightarrow \min$, то загрузка оборудования не учитывается. Обозначив $(\sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}}) = E_3^3$ и $\forall (v (\sum_{p_{xiv}}^m l_{p_{xiv}}))_{\min} = E_{3\min}^3$, получим:

$$K_3^3 \times E_{3\min}^3 \geq E_3^3 \geq E_{3\min}^3.$$

K_3^3 можно принимать равным $K_1^3 = K_2^3$.

Для токарного оборудования с ЧПУ критерии совпадают со станками с ручным управлением, $E_{4T}^3 = E_1^3 (Q_\phi \rightarrow \max)$, $E_{5T}^3 = E_2^3 (C \rightarrow \min)$, $E_{6T}^3 = E_3^3 (T_u \rightarrow \min)$.

Известно, что для дорогостоящего оборудования (фрезерно-сверлильно-расточные станки с ЧПУ) ЦФ $Q \rightarrow \max$ и $C \rightarrow \min$ определяют близкие структуру и параметры операций, поэтому в этих случаях целесообразен критерий: $E_7^3 = E_8^3 = t'_{gv} \times K_q$. Обозначив $\forall v, q (t'_{gv} \times K_q)_{\min} = E_{7,8\min}$, получим:

$$K_3^3 \times E_{7,8\min}^3 \geq E_{7,8}^3 \geq E_{7,8\min}^3.$$

Если целевая функция $T_u \rightarrow \min$, то $E_9^3 = t'_{ev}$, то $E_{9\min}^3 = t'_{ev\min}$,
 $K_9^3 \times E_{9\min}^3 \geq E_9^3 \geq E_{9\min}^3$.

На уровне нахождения параметров технологических переходов критерии, за исключением $T_{II} \rightarrow \min$, исследованы достаточно подробно, в том числе и при многокритериальной оптимизации.

Даны функциональные зависимости Q и C от параметров выполнения операций и перехода (режимов резания, временных потерь различных видов, денежных потерь и так далее). Для правильного выбора важен учет организации смены, заточки инструмента на конкретном предприятии. В общем виде критерий K_1^4 может быть записан:

$$K_1^4 = Q = f(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_j\}, t_e) \times K_{3q} \rightarrow \max,$$

где $\{\{PP_j\}_i\}$ – множеств параметров режимов резания на i -х рабочих ходах; $\{l_{pxi}\}$ – множество длин рабочих ходов; $\{C_j\}$ – временные потери, зависящие от $\{\{PP_j\}_i\}$; t_e – внецикловые потери, не зависящие от $\{\{PP_j\}_i\}$. Критерий K_1^4 имеет вид

$$K_2^4 = C = f_2(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_{cq}\}, C_{ul}) \times K_{3q} \rightarrow \min.$$

Если целевая функция $T_{II} \rightarrow \min$, то внимание заслуживает критерий – максимальная технологическая производительность (производительность резания), K_{pi} на i -ом рабочем ходе. Оговоримся, что применение критерия предусматривает централизованную заточку и наладку инструмента, без отвлечения на эти цели станочника. Для каждого перехода или рабочего хода $K_3^4 = K_p$, тогда $K_3^4 = \sum ((n_i \times s_i) / l_{pxi}) \rightarrow \max$, где n_i , s_i – число оборотов шпинделя и обратная подача. Если такое мероприятие не предусматриваются, то в качестве критерия выбирается $K_3^4 = Q \rightarrow \max$.

Процедуры накопления и обобщения опыта применения критериев

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к системам с ИИ, критерии должны уточняться на основании опыта проектирования. Учитывая, что представленные в статье критерии функционально зависят от параметров ТПр рассматриваемого уровня декомпозиции и параметров технологических подразделений, реализация данного требования не вызывает принципиальных затруднений.

Конкретизируем механизм процесса. Критерии должны уточняться на основе имитационного моделирования (ИМ) или оценки результатов, полученных в ТП. При ИМ преследуются цели: уточнение границ критериев на каждом уровне; определение числа вариантов, оставляемых на каждом уровне; установление влияния изменения величины каждого критерия на изменение значений технико-экономических показателей. Функция ИМ имеет вид

$$K_1^4 = Q = f(\{l_{pxi}\}, \{\{PP_j\}_i\}, \{C_j\}, t_e) \times K_{3q} \rightarrow \max,$$

где $\{E_i^j\}$ – наборы множества критериев, $\{CX_k\}$ – множество системных характеристик ТПр, $\{TЭЭ_i\}$ – множество технико-экономических показателей ТПр (C, Q, T_u); $\{\Delta E_i^j\}$ – изменение критериев, соответствующее $\{TЭЭ_i\}$. Оценка результатов выполнения ТПр в ТП преследует те же цели, но в связи с тем, что получение ряда фактических $TЭП$ затруднен, анализ следует выполнять на основе экспертных оценок качества ТПр, сопоставляя их со значением критериев на уровнях ПТП.

Указанный подход, отражающий особенности организационно-технологического проектирования ТПр, был реализован при разработке САПР ТП для предприятия «Нефтегазгеофизика», выпускающего геофизические приборы и оборудование. По результатам опытной эксплуатации системы можно отметить достаточное качество

спроектированных ТПр (с точки зрения точности обработки деталей), их соответствие целевой функции технологического процесса и производственным условиям.

Библиографический список

1. Палюх, Б.В. Оптимизация процедур поиска технологических решений в комплексной САПР ТП – АСУТП/ Б.В. Палюх, Г.Б. Бурдо // Вестник Ижевского государственного технического университета. Ижевск, 2010. № 3 (47). С. 109–112.

2. Бурдо, Г.Б. Исследование процедур проектирования технологий в системах автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами / Г.Б. Бурдо // Вестник Ижевского государственного технического университета. Ижевск, 2010. № 4 (48). С.109–113.

3. Палюх, Б.В. Теоретические основы комплексной автоматизированной системы проектирования и управления технологическими процессами в многономенклатурном производстве / Б.В. Палюх, Г.Б. Бурдо // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. «Технические науки». Самара, 2010. № 4 (27). С.44–54.

4. Бурдо, Г.Б. Организационно-технологический подход к разработке САПР технологических процессов / Г.Б. Бурдо, Н.В. Испирян, С.Р. Испирян // Вестник Тверского государственного технического университета. Тверь: ТвГТУ. 2015. № 1 (27). С.81–84.